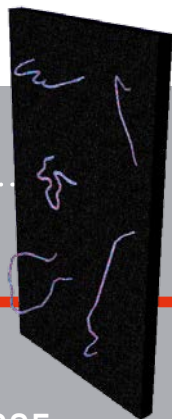
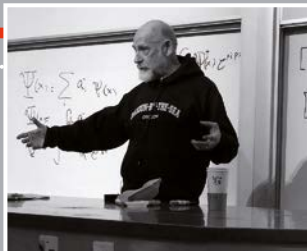
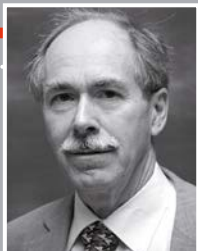


1990-1993

Gerard 't Hooft et Leonard Susskind postulent le principe de « complémentarité des trous noirs ».



1995

Joseph Polchinski développe l'idée de D-branes en théorie des cordes.

1996

Le problème de l'entropie d'un trou noir est résolu par Andrew Strominger et Cumrun Vafa.



de base requises pour rendre compte de l'entropie du trou noir, au moins pour certains trous noirs très symétriques. L'énigme de l'entropie était en voie de résolution.

La question suivante concernait la perte d'information. En 1997, Juan Maldacena, actuellement à l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey, a proposé un moyen de contourner le problème de la perte d'information, solution parfois nommée dualité de Maldacena (ou correspondance AdS/CFT). Une dualité est une équivalence entre deux choses en apparence très différentes. La dualité de Maldacena montre que les mathématiques d'une théorie combinant la physique quantique et la gravitation (une théorie quantique de la gravitation), et fondée sur la théorie des cordes, sont équivalentes aux mathématiques d'une théorie quantique ordinaire, sans gravitation, mais dans un jeu de conditions particulières. Par exemple, la physique quantique d'un trou noir est équivalente à celle d'un gaz chaud de particules nucléaires.

La conséquence de la dualité de Maldacena est que l'une des deux façons d'aborder le problème du trou noir ne repose que sur les lois de la physique quantique (sans relativité générale et sans horizon), où l'information ne peut pas être perdue. Le trou noir doit donc préserver l'information. Et comme les trous noirs ne laissent pas de vestiges en s'évaporant, l'information doit ressortir avec le rayonnement de Hawking.

Un aspect étonnant de la dualité est que le scénario sans gravité opère dans un espace ayant une dimension de moins que dans l'autre scénario. Cela signifie que ce que nous nommons l'espace-temps pourrait

être différent de ce que nous percevons ; il faudrait le comprendre davantage comme un hologramme tridimensionnel projeté depuis la surface bidimensionnelle plus fondamentale d'une sphère.

Juan Maldacena a découvert la dualité qui porte son nom en s'attaquant précisément aux questions d'entropie et de perte d'information dans le trou noir. C'est sans doute avec la dualité de Maldacena que nous nous sommes rapprochés le plus d'une unification de la relativité générale et de la physique quantique. Toutefois, il reste à prouver que cette conjecture est vraie même si elle est étayée par de nombreux indices. L'idée a d'ailleurs convaincu Stephen Hawking qui a annoncé, en 2004, qu'il avait changé d'avis concernant la perte d'information dans les trous noirs. Cependant, la dualité de Maldacena n'explique pas clairement comment l'information passerait de l'intérieur à l'extérieur du trou noir.

L'information n'est pas perdue dans le trou noir

Revenons une vingtaine d'années plus tôt, à l'époque où les physiciens essayaient de comprendre comment l'information tombée dans le trou noir pouvait s'en échapper. Leonard Susskind, de l'université Stanford, et Gerard 't Hooft, de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas, proposèrent une solution étonnante reposant sur un principe dit de complémentarité des trous noirs. Pour l'essentiel, d'après ce principe, un observateur plongé dans un trou noir voit l'information qui s'y trouve, alors qu'un observateur extérieur voit la même information sortir de l'astre. Selon ces physiciens, il

n'y a pas de contradiction puisque les deux observateurs, situés de part et d'autre de l'horizon des événements, ne peuvent pas communiquer.

La dualité de Maldacena et la complémentarité des trous noirs semblaient dissiper tous les paradoxes. La première implique la conservation de l'information, la seconde indique comment l'information s'échappe du trou noir. Mais de nombreux détails restaient à vérifier. Il y a trois ans, mes collègues et moi (AMPS) avons essayé de combiner toutes ces idées pour voir s'il restait des contradictions, en se fondant sur des travaux de Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, et Steven Giddings, de l'université de Californie à Santa Barbara (et en prolongeant, sans le savoir, un raisonnement plus ancien de Samuel Braunstein, de l'université d'York au Royaume-Uni). Après de vaines tentatives d'obtenir un modèle qui fonctionne, nous avons compris que le problème était plus profond et ne se résolvait pas à nos faiblesses mathématiques : une contradiction demeurerait.

Cette contradiction surgit quand on considère le phénomène d'intrication quantique entre particules. L'intrication est sans doute l'aspect de la physique quantique le plus contraire à l'intuition et le plus éloigné de notre expérience. Si les particules étaient des dés, deux particules intriquées seraient comme deux dés dont la somme des faces affichées est toujours égale à sept : si vous lancez les dés, et que le premier affiche deux, alors le second indiquera forcément cinq. De la même façon, quand les physiciens mesurent les propriétés d'une particule intriquée, la mesure détermine aussi les caractéristiques de sa partenaire.



1997
Juan Maldacena propose
la dualité qui porte son nom.

2004

Stephen Hawking admet que l'information
est préservée dans un trou noir.



2013

Joseph Polchinski postule
l'idée de mur de feu.

Par ailleurs, une particule ne peut pas être complètement intriquée en même temps avec deux systèmes quantiques différents (des particules ou des groupes de particules). L'intrication est exclusive ou «monogame».

Dans le cas du trou noir, considérons une particule du rayonnement de Hawking, notée B, émise lorsque le trou noir est plus qu'à moitié évaporé. Le processus de Hawking implique que B fait partie d'une paire et que sa partenaire A tombe dans le trou noir. Les particules A et B sont intriquées. Cependant, en accord avec le principe de complémentarité des trous noirs, l'information qui est tombée dans le trou noir lors de sa formation est encodée dans l'ensemble des particules du rayonnement de Hawking. Donc, si l'information n'est pas perdue, la particule B doit être intriquée avec une combinaison C des autres particules du rayonnement de Hawking qui se sont déjà échappées. Mais il y a alors une contradiction: la particule B est intriquée avec deux systèmes différents, A d'une part, C d'autre part. On a ici un cas de polygamie!

Comment respecter les règles de la physique quantique et ne pas perdre l'information dans le trou noir? La solution est de rompre l'intrication entre A et B, apparues sous la forme d'une paire particule-antiparticule sur l'horizon des événements. Dans la théorie quantique, la rupture d'un lien d'intrication, comme celle

d'une liaison chimique, se traduit par une libération d'énergie. Casser l'intrication de toutes les paires virtuelles sur l'horizon des événements conduit à peupler cette région en particules de haute énergie. Autrement dit, l'horizon devient un «mur de feu».

le raisonnement était simple, et nous ne trouvions pas de faille. D'une certaine façon, nous avons repris à l'envers l'argument original de Stephen Hawking, en supposant que l'information n'est pas perdue et en regardant où cette hypothèse mènerait. Nous avons conclu qu'il y avait une faille dans la relativité générale. Lorsque nous avons exposé notre raisonnement à d'autres physiciens, la réaction initiale était un grand scepticisme, auquel succédait une perplexité comparable à la nôtre.

Soit ces étranges murs de feu existent vraiment, soit il semble que nous devrions une fois de plus envisager de renoncer à certains principes de la théorie quantique. Il se peut que l'information ne soit pas détruite, mais peut-être qu'une réécriture de la physique quantique est à prévoir.

Malheureusement, l'observation de trous noirs réels ne tranchera pas la question: tout rayonnement émanant d'un mur de feu serait très faible et difficile à voir.

Si les murs de feu existent, ils pourraient avoir des conséquences étonnantes. L'une d'elles est qu'ils pourraient marquer la fin de l'espace. Les conditions pour que l'espace-temps se forme n'existeraient pas à l'intérieur du trou noir. Donald Marolf a avancé l'idée que l'intérieur ne peut pas se former parce que «la mémoire quantique du trou noir est pleine». Si l'espace-temps ne peut pas se trouver à l'intérieur, alors

Le mur de feu est une manifestation de la limitation de nos formulations actuelles de la gravité quantique

Un astronaute qui chuterait vers le trou noir, plutôt que de traverser l'horizon en douceur, rencontrerait un milieu extrême.

La découverte d'une telle rupture avec la relativité générale (un mur d'énergie à un endroit où rien de particulier ne devrait se passer) était dérangeante, mais